

化学工学的観点から考える食品加工プロセスの強化

増田 勇人^{1, †}, 大村 直人², 下山田 真¹

¹ 静岡県立大学 食品栄養科学部, ² 神戸大学大学院 工学研究科

1. はじめに

化学工業において、プロセス強化 (Process Intensification: PI) はすでに新しいパラダイムとして認識されている。PIに関する歴史や動向は黒田と松本によって説明されており [1], PIは当初、単にプラントの小型化という捉え方をされていた。しかし近年では、持続可能な社会実現にむけたコスト低減や省エネルギーかつ省資源、さらに安全性の向上なども含めた“性能を飛躍的に向上させる”ための技術戦略としての捉え方もされている。このPI技術は化学産業のみならず、広義でのモノづくりをしているすべての産業に応用展開していくことが可能と考えられる。現在、筆者らはPI技術を食品分野に応用し、新規食品加工プロセスの開発に取り組んでいる。本稿では、PI技術の導入にあたり、食品分野における現状や課題について述べた後、流体工学的なアプローチに基づく食品加工プロセスの開発例を紹介する。

2. PIの概要と食品分野への応用

StankiewiczとMoulijnはPIをある種の工具箱と見立てて、装置 (Equipment) と方法 (Method) の2つの領域に分けて様々なPI技術を紹介している [2]。ここでは、PI達成に向けた装置設計を考えてみる。PI達成に向けた戦略はすでにいくつかの名著で紹介されており、本稿では詳細は述べないが、Reay *et al.* は基本戦略として、i) 輸送速度 (運動量, 熱, 物質) を強化、ii) すべての分子に同じ履歴をもたせる、としている [3]。また、BoodhooとHarveyの著書にあるように、“バッチ

チ式から連続式への転換 (batch to continuous)”も重要な戦略である [4]。連続操作では、操作性や安全性の向上、ランニングコストの削減など様々な利点がある。例えば、滞留時間分布のシャープな反応装置であれば、すべての分子に同じ履歴をもたせながら、連続操作が可能である。つまり、輸送速度が高く、かつシャープな滞留時間分布を有する装置を提案することがPI達成に向けた装置設計戦略といえる。そのような装置例として、スラグ流を利用した反応器や [5], 振動流と固体障害壁を組み合わせた反応装置 [6], そして本稿で紹介する回転式二重円筒間流れ (テイラー・クエット流) を利用した反応装置などが挙げられる。

食品分野においても、PIの概念と重要性はすでに認識されている。実際に2017年5月にイタリア、ミラノで13th International Conference on Chemical and Process Engineeringと共催されたEngineering Future Food (EFF) 2017でもFood Process Intensificationのセッションが用意されており、欧米ではホットなテーマであることが窺える。なお、2019年5月に同じくイタリア、ポローニャで開催予定のEFF2019においてもFood Process Intensificationのセッションが多く設けられている。一方で、PI実現に向けて、食品分野特有の課題もある。例えば、Boom *et al.* は、1) 食品加工は従来までの手法に重きを置いていること、2) 原料費に比べて、加工費が低いこと、3) 安全性を最重要視するため、イノベーションが起きにくいこと、の3つが主な課題として挙げている [7]。しかし、地球規模で想定される危機、たとえば発展途上国における人口爆発に伴う食糧危機、環境汚染、高騰するエネルギー問題を考えれば、食品産業界においても省資源・省エネルギー型プロセスへの転換は避けられないといえる。そのため、PI技術は積極的に応用する価値があり、上述したような課題に留意したうえで、既存のプロセスよりも飛躍的に性能を向上させることができれば、食品加工プロセスにおいてもイノベーションが創出できるであろう。次節以降、筆者らが取り組んでいるテイラー・クエット流を利用したデンプン加水分解プロセスの強化を紹介していく。

著者略歴

増田 勇人

静岡県立大学 食品栄養科学部

2011年3月 神戸大学工学部応用化学科 卒業

2013年3月 神戸大学大学院工学研究科応用化学専攻修士課程 修了

2016年3月 神戸大学大学院工学研究科応用化学専攻博士課程 修了

2016年4月 静岡県立大学食品栄養科学部 助教, 現在に至る

〒422-8526 静岡県静岡市駿河区谷田 52-1

† Fax: 054-264-5525, E-mail: hayato-masuda@u-shizuoka-ken.ac.jp

3. テイラー・クエット流反応装置を利用したデンプン加水分解プロセスの強化

デンプンから糖を生産する加水分解プロセスは、食品分野では頻繁に用いられており、また、バイオエタノールの前処理プロセスなど様々な産業界においても重要とされる。一般にこのプロセスでは、デンプン懸濁液に熱を加えて糊化させた後、アミラーゼを加えて糖化させる(図1)。このとき、糊化プロセスでは粘度が急激に増大し、糖化プロセスでは減少する。また、糊化プロセスでは伝熱やデンプン粒子周りへの水分の輸送が必要とされる一方で、糖化プロセスでは酵素を傷つけないよう穏やかに、かつ効率的な混合操作が求められる。一連のプロセス中における激しい粘度変化に加え、各プロセス間で求められる操作が異なることから、産業的には、糊化プロセスではジェットクッカーやエクストルーダーを用いて、糖化プロセスでは別の攪拌槽などを用いる、つまり各プロセスで別々の装置を用いるのが一般的である。それゆえ必然的にプロセス全体のコンパクト化は行えず、効率的なプロセスが構築できていない。そこで、筆者らは固定式外円筒と回転式内円筒の共軸円筒間に生じる“テイラー・クエット流”を用いて、デンプン加水分解プロセスの強化を行っている[8,9]。

二重円筒間に流体を満たし、外円筒を静止、内円筒を回転させると流れ方向に圧力勾配をもたない単純せん断流(クエット流)が形成される。内円筒回転速度を増加させていき、ある回転速度を超えると、テイラー渦流とよばれる、互いに逆方向に回転するドーナツリング状の渦セルが軸方向に連なった流れが形成される(図2)。この流れ系は周方向レイノルズ数をパラメータとして、レイノルズ数上昇に伴い、クエット流から層流テイラー渦流へと遷移し、さらに渦構造が波打つ(wavy motion)波動テイラー渦流を経て、最終的には乱流へとカスケード型の遷移特性を示す。このテイラー・クエット流を利用した反応装置(Taylor-Couette flow reactor: TCFR)の特徴として、まずテイラー渦

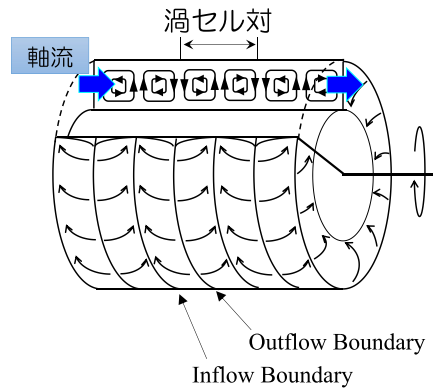


図2 テイラー・クエット流

流の対流運動により、混合および伝熱が強化されることが挙げられる。また、比較的小さな軸流を与えると、テイラー渦流が崩壊することなく(渦構造を保ったまま)、押し出される。そのため、軸方向への拡散を抑えながら連続操作が可能となり、シャープな滞留時間分布が得られる。Kataoka *et al.* がこれらの特徴を報告して以降[10]、TCFRは様々な化学プロセスへ適用されてきた。例えば、重合反応[11]、粒子生成や触媒反応などが挙げられる[12,13]。近年では、これらの特徴に加え、局所的なせん断がかからず、穏やかな条件下での混合操作が可能となることに着目して、脆弱な物質を扱う細胞培養や酵素反応への適用も盛んに行われるようになってきた[14]。

TCFRをデンプン加水分解プロセスに適用した例を紹介する。まず、実際に実験で用いられたデンプン加水分解用のTCFRを図3に示す。装置入口より、円筒間の隙間にデンプン懸濁液を流通させ、装置中央部より酵素(α -アミラーゼ)を供給した。そのため、装置前半部を糊化プロセス、後半部を糖化プロセスとみなすことができる。また、装置中央部を境にジャケットが二分割されており、前半部(糊化プロセス)には85℃の温水、後半部(糖化プロセス)には40℃の水をそれぞれ流して、温度制御を行った。得られた糖収率と流動状態の関係を図4に示す。臨界レイノルズ数

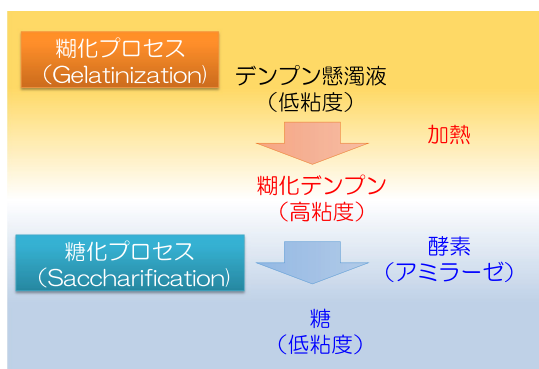


図1 デンプン加水分解プロセス

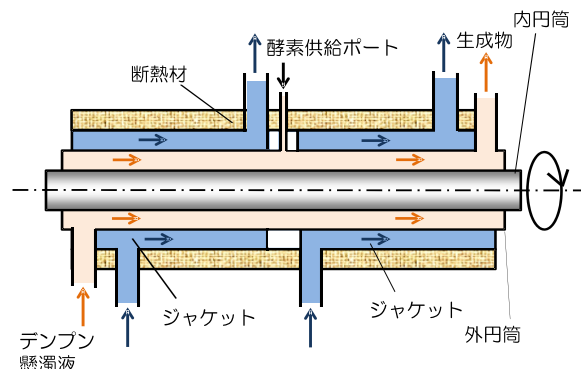


図3 テイラー・クエット流反応装置 (TCFR)

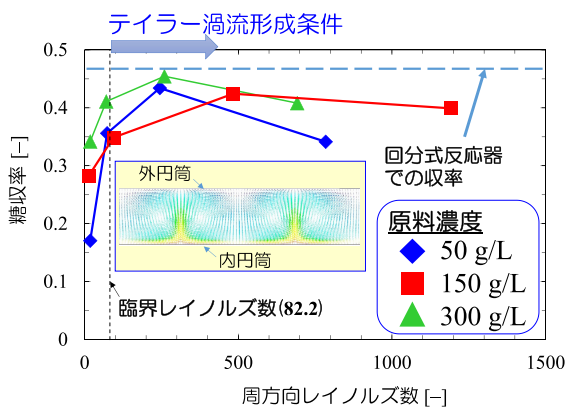


図4 装置内流動状態と糖収率の関係 (Ohmura *et al.*, J. Chem. Eng. Japan, 51 (2), 129135 (2018) の Fig. 3 の一部を転載)

上においては、図中に示すようなテイラー渦流（ここでは数値解析によって得られた断面図の速度ベクトルを示す）が形成されていることが確認されている。図4から、テイラー渦流が形成される条件下では、比較的高い糖収率が得られることがわかる。例えば、デンプン濃度が 50 g/L のときでは渦なし条件と比較して、約 3 倍の糖収率が得られた。なお、レイノルズ数が約 500 以降では糖収率が少し低下しているが、これはテイラー渦流が波打つ wavy motion が起こり、軸方向拡散が促進されてしまうこと、つまり滞留時間分布がブロードになることが主な原因と考えているが、詳細は現在検討中である。また、図中に示す点線は同一反応条件における回分式反応器での結果を示しており、テイラー渦流が形成される条件では、連続操作でありながらも回分式反応器とほぼ同程度の収率が得られた。さらに特筆すべきは、デンプン濃度 300 g/L のような比較的高濃度のデンプンにおいても、効率的かつ連続的に糖化できていることである。高濃度系になると糊化させたデンプンは非常に粘度が高くなってしまい、通常の攪拌槽などでは均一に酵素と混合させることが難しくなってしまうが、TCFR では高濃度系への応用も可能である。実用化への観点からは、さらに高濃度（400～500 g/L 以上）での検討も必要と考えられるものの、単一の反応器で連続的かつ効率的に処理が行えたことから、食品分野における将来的な PI 実現の可能性を示したひとつの例であるといえる。

4. Food Process Intensification の実現に向けて

PI 技術で期待される効果は単なる装置の改善・改良 (improvement) ではなく、オーダーを超えた、飛躍的性能向上である（これを Quantum Leap という）。しかし、プロセスを従来型の装置をベースとした単位操作の足し合わせで考えているのは、想定した装置のもつ最大性能以上の向上は望めないであろう。Quantum Leap

を実現するためには、プロセスを設計していく際に根本的な発想を転換する必要がある [15]。そこで近年、プロセスを単位操作の組み合わせではなく、機能要素の組み合わせ（ネットワーク）として捉え直すことが提案されている [16]。そして、それを PI へと応用展開するためには、各要素間における相互作用のモデリングが重要となる。通常、物質生産を行うプロセスでは化学反応のダイナミクスや輸送現象のダイナミクスが非線形的に相互作用するため、非常に複雑な動的挙動が観察される。これらを適切に解析・モデリングすることが PI 実現に向けて重要となるが、Food Process Intensification にはさらに踏み込んだ解析が必要となる。例えば、多くの液状食品は原子・分子スケールよりも大きな内部構造を有し、複雑流体として取り扱わなければならないだろう。いわゆる非ニュートン流体特有の現象が発現し、単純・希薄系で確立されてきた従来通りの理論では適切なプロセス設計・制御が行えない。あるいは、分子レベルの問題として、多くの食品の中心成分であるタンパク質の取り扱いも検討すべきである。例えば、食品加工中では加熱操作などによって、タンパク質の変性が起こるが、このマイクロスケールな変性挙動によって粘度などのマクロな物理量変化も引き起こされる。粘度はプロセス設計・制御指針にとって重要な因子であるから、タンパク質の変性挙動と粘度の関係などを把握する必要があるが、タンパク質の変性を定量的に評価する指標が構築されておらず、速度論的な取り扱いは現状、困難である。さらに、食品加工プロセスにおける諸問題の根本としてあるのは、原料である生物素材の特殊性である [17]。生物素材は季節性であり、さらに多成分かつ不均一性でもある。また、組成や構造も多様であり、プロセス設計・制御に必要な物性値は一意に定まらない。そればかりか、加工中にも変化し、物理的・化学的・生化学的変化までも併発する。このような難点を列挙すると、Food Process Intensification はおろか、合理的な食品加工プロセスの構築すら困難に思えてくる。しかし、食品加工プロセスにおいても化学工学的アプローチは不可欠であり、1979 年、当時の化学工学協会（現：化学工学会）のなかに食品化学工学研究会が誕生して以降、多くの研究者・技術者の尽力により、工学と食品学の融合が発展してきたように思える。幸い、近年の様々な測定機器の進化や、コンピュータ・計算技術の急速な発展に伴い、マルチスケールにおける多角的な現象解析が可能になってきた。これらの技術を駆使することで、従来型装置をベースとした食品加工プロセスからの脱却、すなわちプロセスの量的な飛躍を目指した Food Process Intensification の実現に近づくことが期待される。

5. お わ り に

本稿では、食品分野へのプロセス強化技術の応用として、テイラー・クエット流反応装置を利用した食品加工プロセス開発事例、および食品分野におけるプロセス強化の今後の展開について述べた。Food Process Intensificationには工学・食品学の融合は必要不可欠であるが、PIにおいて各要素間の相互作用が重要であるのと同様に、お互いの分野の研究者同士が相互作用しあうことが大切であろう。その過程で、工学か食品学か、というような二元論ではなく、各々がそのどちらにも精通していくことがFood Process Intensificationに必要な要素のように思える。

引 用 文 献

- 1) 黒田千秋, 松本秀行; グリーンプロセス工学 (GPE) とプロセス強化 (PI), 化学工学, **72**, 180-183 (2008).
- 2) A. Stankiewicz, J. A. Moulijn; Process intensification: transforming chemical engineering. Chem. Eng. Progr., January, 22-34 (2000).
- 3) D. Reay, C. Ramshaw, A. Harvey; Process Intensification, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2008.
- 4) K. Boodhoo, A. Harvey; Process Intensification for Green Chemistry, John Wiley & Sons, Inc., Chichester, UK, 2013.
- 5) J. R. Burns, C. Ramshaw; The intensification of rapid reactions in multiphase systems using slug flow in capillaries, Lab Chip, **26**, 303-305 (2003).
- 6) P. Stonestreet, A. P. Harvey; A mixing-based design methodology for continuous oscillatory flow reactors. Chem. Eng. Res. Des., **80**, 31-44 (2002).
- 7) R. M. Boom, A. J. van der Goot, A. E. M. Janssen, K. G. P. H. Schroën; Food process intensification for better sustainability. Proceedings of ICEF11, FMS1276, Athens, Greece, 2011.
- 8) H. Masuda, T. Horie, R. Hubacz, N. Ohmura; Process intensification of continuous starch hydrolysis with a Couette-Taylor flow reactor. Chem. Eng. Res. Des., **91**, 2259-2264 (2013).
- 9) H. Masuda, T. Horie, R. Hubacz, N. Ohmura, M. Shimoyamada; Process development of starch hydrolysis using mixing characteristics of Taylor vortices. Biosci. Biotechnol. Biochem., **81**, 755-761 (2017).
- 10) K. Kataoka, H. Doi, T. Hongo, M. Futagawa; Ideal plug-flow properties of Taylor vortex flow. J. Chem. Eng. Japan, **8**, 472-476 (1975).
- 11) K. Kataoka, N. Ohmura, M. Kouzu, Y. Simamura, M. Okubo; Emulsion polymerization of styrene in a continuous Taylor vortex flow reactor. Chem. Eng. Sci., **50**, 1409-1416 (1995).
- 12) T. Ogihara, N. Ogata, K. Fujita, S. Sato, M. Nomura, K. Horinouchi; Continuous synthesis monodispersed alumina particles by the hydrolysis of metal alkoxide using Taylor vortex. J. Ceram. Soc. Japan, **103**, 151-154 (1995).
- 13) J. G. Sczechowski, C. A. Koval, R. D. Noble; A Taylor vortex reactor for heterogeneous photocatalysis. Chem. Eng. Sci., **50**, 3163-3173 (1995).
- 14) B. Haut, H. B. Amor, L. Coulon, A. Jacquet, V. Halloin; Hydrodynamics and mass transfer in a Couette-Taylor bioreactor for the culture of animal cells. Chem. Eng. Sci., **58**, 777-784 (2003).
- 15) 中岩勝, 大森隆夫; 蒸留プロセスのイノベーション, 理想状態からの「デチューニング」によるプロセス強化, Synthesiology, **2**, 51-59 (2009).
- 16) H. Freund, K. Sundmacher; Towards a methodology for the systematic analysis and design of efficient chemical processes Part1. From unit operations to elementary process functions. Chem. Eng. Process., **47**, 2051-2060 (2008).
- 17) 矢野俊正; 食品加工プロセスの変遷と食品工学, 日本農芸化学会誌, **61**, 176-180 (1987).

〔化学工学 Vol.82, pp.296-298 より転載〕